

УДК 622.1:622.834.1

© А.С. Кучин

**МЕХАНИЗМ СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ
ДВИЖУЩЕГОСЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

© А. Kuchin

**THE MECHANISM OF ROCK MASS DISPLACEMENT IN CONDITIONS
OF ADVANCING LONGWALL FACE**

В роботі на підставі маркшейдерських інструментальних спостережень за зрушенням гірських порід та земної поверхні визначені зони зрушення та підвищеного гірського тиску над очисним вибоєм, що рухається. Окремо розглянуті закономірності зрушення гірського масиву над очисним вибоєм, підготовчими виробками та над розрізною піччю.

В работе на основании маркшейдерских инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород и земной поверхности определены зоны сдвижения и повышенного горного давления над движущимся очистным забоем. Отдельно рассмотрены закономерности сдвижения горного массива над очистным забоем, подготовительными выработками и над разрезной печью.

Существующие схемы процесса деформирования горных пород рассматривают границы выработанного пространства независимо от направления отработки очистной выработки. Изначально предполагается, что движение очистного забоя оказывает влияние только на динамические параметры процесса и величины сдвижений и деформаций. После остановки забоя все границы выработанного пространства считаются равнозначными с точки зрения деформированности горных пород и земной поверхности. Различие в параметры процесса сдвижения вносят только такие факторы как степень подработанности и угол падения пласта.

Анализ результатов инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности и массива горных пород в Западном Донбассе свидетельствует о том, что процесс сдвижения по контуру очистной выработки развивается неравномерно уже на стадии формирования мульды сдвижения. Первые признаки такой неравномерности наблюдаются при отходе забоя лавы от разрезной печи на расстояние $0.15D/H$. При размере выработанного пространства в направлении движения забоя $1.5D/H$ процесс переходит в стадию синхронного сдвижения и соотношение сдвижений и деформаций в различных полумульдах остается практически постоянным (за исключением остаточного деформирования массива при вторичном уплотнении горных пород). Таким образом, интерес представляет механизм сдвижения горных пород и земной поверхности на стадии формирования мульды сдвижения.

Рассмотрим схемы сдвижения массива горных пород при различных размерах выработанного пространства. На рис. 1 на основании обобщения и анализа результатов инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхно-

сти и горных пород [1-3] представлена схема деформирования горных пород над очистной выработкой при удалении очистного забоя от разрезной печи на расстояние $0.15D/H$.

На схеме выделены следующие зоны:

- 1,2 – опорного горного давления с незначительными деформациями сжатия по нормали к напластованию. Горизонтальные деформации в этой зоне отсутствуют;
- 3,4 – опорного давления с максимальными сжатия по напластованию. В этой зоне преобладают горизонтальные растягивающие усилия;
- 5 – пониженных или нулевых напряжений по нормали к напластованию и повышенных горизонтальных напряжений;
- 6 – полных сдвижений с вертикальными растягивающими усилиями;
- 7 – поднятий горных пород и вертикальных растяжений по нормали к напластованию. Эта зона находится в нижней части зоны 4, а её высота зависит от скорости подвигания очистного забоя. При его длительных остановках зона 7 может полностью отсутствовать.

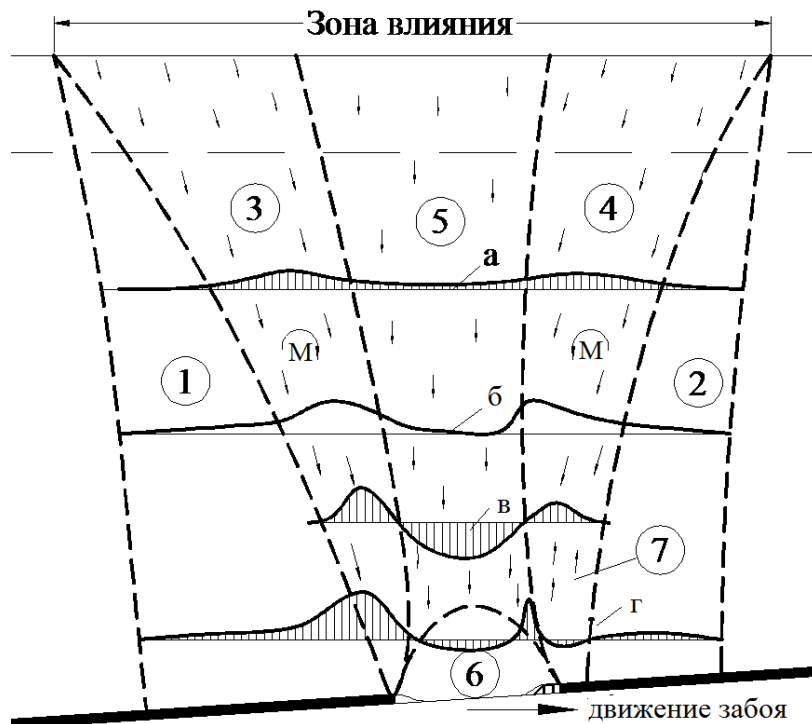


Рис. 1. Схема деформирования горных пород над очистной выработкой при $0.15D/H$: а, б, в – эпюры прироста вертикальных напряжений (деформаций), г – эпюра горизонтальных напряжений (деформаций)

Представленная для условий западного Донбасса схема имеет много общих зон сдвижения с классическими схемами. Но при этом она имеет некоторые отличия: отсутствует зона беспорядочного обрушения; добавлена зона разгрузки

ки горных пород над очистным забоем; зона опорного давления по проявлению горизонтальных напряжений разделена на две зоны.

Рассмотрим перераспределение вертикальных и горизонтальных усилий в зоне влияния очистной выработки.

При отсутствии влияния очистной выработки элементарный объем массива находится в состоянии равновесия. При этом на него действуют нагрузки, вызванные весом вышележащей толщи горных пород и силами бокового распора. При горизонтальном залегании пласта напряжения, вызванные этими нагрузками, можно рассматривать как главные. Следовательно, напряженное состояние элементарного объема нетронутого горного массива можно представить классической схемой (рис. 2).

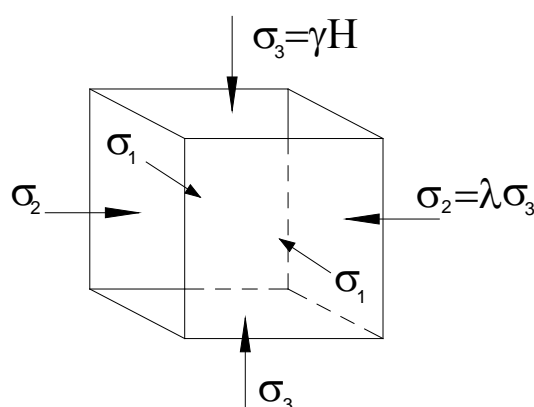


Рис. 2. Схема напряженного состояния элементарного объема массива горных пород при отсутствии влияния очистной выработки

Коэффициент λ называется **коэффициентом бокового давления** или **коэффициентом бокового отпора**. Этот коэффициент показывает, какую часть вертикальной нагрузки, действующей в рассматриваемой точке массива, составляют силы или напряжения, действующие в горизонтальной плоскости:

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu},$$

где ν – коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона).

Под действием опорного давления массив выходит из равновесного состояния. Величина главного напряжения по нормали к напластованию увеличивается на некоторую величину $\Delta\sigma_3$. Опорное давление на стадии формирования мульды сдвижения возрастает с увеличением размеров выработанного пространства до момента, когда наступит условие полной подработки в пределах коренных пород. Таким образом, в зонах 3, 4 под действием опорного давления увеличиваются вертикальные напряжения σ_3 . При этом под действием изгибающего момента M (рис. 1) и растягивающих усилий напряжения σ_2 снижают-

ся, что способствует вначале упругому, а после неупругому горизонтальному деформированию массива.

В зоне 5 наблюдается противоположная картина. Вследствие вертикальной разгрузки напряжение σ_3 стремится к нулю. При этом напряжения, вызванные боковыми усилиями со стороны зон 3 и 4 приводят к горизонтальным сжатиям массива. Рассмотрим схематически поведение массива в двух смежных зонах 3 и 5 (рис. 3).

В зоне 3,4 при увеличении вертикальной нагрузки на массив происходит его поперечная деформация, которая в зависимости от величины σ_3 может быть упругой или пластичной. Вследствие уменьшения вертикальных напряжений в зоне 5, а соответственно и уменьшения сил бокового давления, происходит деформирование пород в горизонтальной плоскости. Оно сопровождается появлением перемещений ξ в сторону разгруженного массива. В зоне 5 под действием горизонтальной нагрузки со стороны зон 3 и 4 происходит вертикальная деформация горных пород, передаваемая на вышележащие и нижележащие слои. Таким образом, повышенное горное давление в зонах 3,4 приводит к появлению дополнительных вертикальных растягивающих напряжений (деформаций) в зоне 6, которые препятствуют переходу массива в первоначальное состояние. Этим можно объяснить наличие вертикальных растяжений нижней группы глубинных реперов в области полной подработки массива [1].

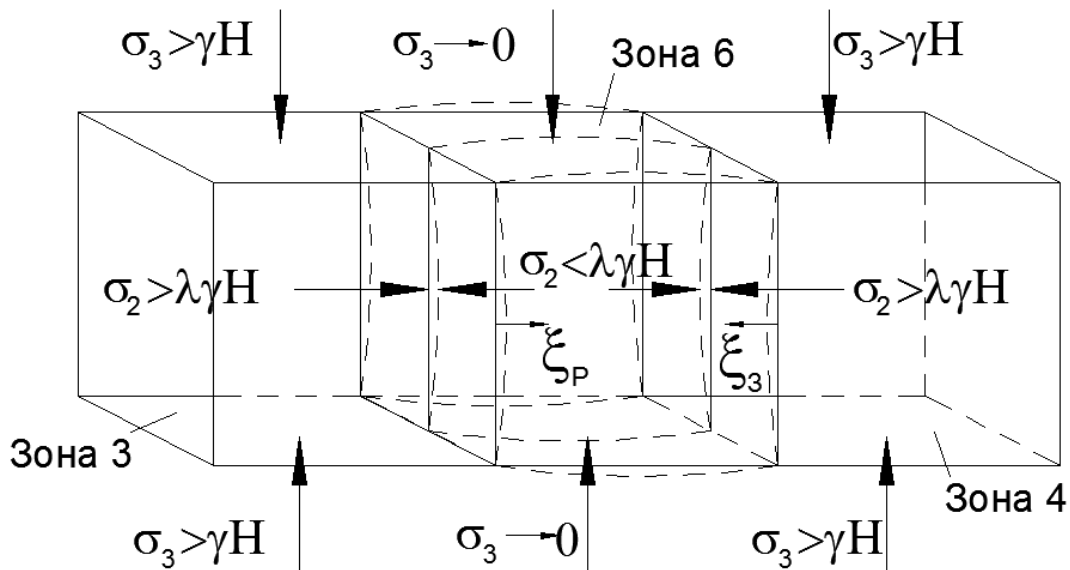


Рис. 3. Схема перераспределения напряжений в зонах 3,4 и 5

При увеличении выработанного пространства вертикальные напряжения σ_3 над краевой частью угольного пласта постепенно увеличиваются. При этом увеличиваются размеры полной подработки массива в зоне полных сдвижений 6, а соответственно и граница контакта пригруженных и разгруженных пород (рис. 4). Увеличение высоты зоны 6 (высоты купола H_6) происходит до тех пор,

пока размер выработанного пространства не достигнет $1.5H$. Выше границы этой зоны породные слои не находятся в разгруженном состоянии и создают нагрузку равную собственному весу. Часть этой нагрузки передается на нижележащие слои зоны 6, а часть на краевую часть угольного пласта. Таким образом, формируются зоны повышенного горного давления 3 и 4. Вследствие податливости массива над краевой частью угольного пласта опорное давление передается вглубь целиковой части массива постепенно затухая.

Лабораторными исследованиями [4] установлено, что период интенсивных деформаций ползучести при постоянной нагрузке для горных пород Западного Донбасса достигает 10 сут, а общий период реологических процессов для некоторых образцов составил около месяца. Этим можно объяснить увеличение максимальных горизонтальных деформаций и дополнительных оседаний земной поверхности над разрезной печью после окончания формирования вертикальных нагрузок на краевую часть массива (полная подработка земной поверхности).

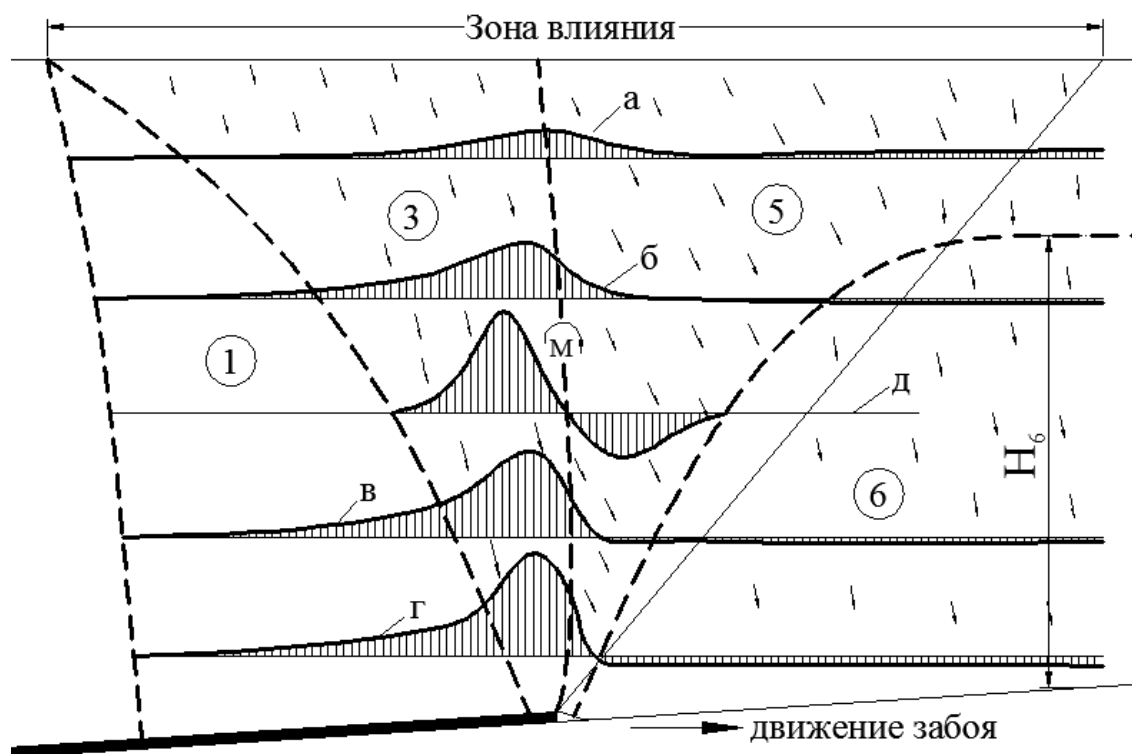


Рис. 4. Схема деформирования горных пород над очистной выработкой при полной подработке: а, б, в, г – эпюры прироста вертикальных напряжений (деформаций), д – эпюра горизонтальных напряжений (деформаций)

Аналогичные процессы наблюдаются на контакте зон 5 и 4.

Следует отметить, что над разрезной печью постепенное увеличение вертикальных нагрузок приурочено к определенному объему горных пород. Ины-

ми словами повышенное горное давления сосредоточено над краевой частью угольного пласта и при увеличении выработанного пространства практически не изменяет своего положения. Над движущимся очистным забоем зона повышенного горного давления перемещается впереди него. При этом прироста (накопления) горного давления на одном участке не наблюдается, а, следовательно, не наблюдается развитие реологических процессов в породном массиве.

Таким образом, реологические свойства горных пород над разрезной печью и над движущимся очистным забоем проявляются неодинаково. Влияние изменения физико-механических свойств горных пород во времени на напряженно-деформированное состояние массива вокруг разрабатываемой очистной выработки исследовалось [5] при помощи метода конечных элементов. При этом использовался метод переменных модулей, предложенный в работе [6]. В соответствии с этим методом модуль деформаций представляется как временная функция:

$$E_t = \frac{E}{1 + \varphi(t)}, \quad \varphi(t) = \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1 - \alpha}$$

где $\varphi(t)$ – функция ползучести горных пород, учитывающая изменение свойств угольного массива во времени; δ и α – характеристики ползучести, получаемые экспериментально; t – время воздействия напряжений, лет.

Согласно теории процесса сдвижения горизонтальные сдвижения и деформации горного массива и земной поверхности являются следствием изгиба породных слоев за счет опускания пород кровли разрабатываемого пласта. Комплекс выполненных исследований указывает на то, что горизонтальные сдвижения над разрезной печью составляют 50-60% от величины максимального оседания. Столь большие величины сдвижений не могут являться следствием только изгиба породных слоев.

Предположим, что угольный пласт и вмещающие породы являются абсолютно несжимаемыми (жесткими). В этом случае над границей выработанного пространства вертикальные и горизонтальные сдвижения массива и земной поверхности будут равны нулю.

В реальных условиях разработки угольных пластов абсолютно жестких пород не существует. В этом случае породные слои над краевой частью угольного пласта следует рассматривать как балки на податливом основании. Степень податливости основания характеризует величины прогиба, вертикальных и горизонтальных сдвижений над границей выработанного пространства. Как указывалось выше, податливость массива реализуется через упругие и пластические деформации. Для жестких слоев с большими прочностными характеристиками точка перегиба кривой оседаний земной поверхности (точка с максимальными наклоном) будет расположена на большем расстоянии от границы выработки, чем в случае со слабыми породами. Соответственно величины оседаний над выработанным пространством в первом случае будет иметь меньшие значения, чем во втором. При увеличении прочности пород уменьшаются дальность влияния очистной выработки за границы её контура, а соответственно уменьшается и ширина зоны опорного давления.

Как оговаривалось ранее, степень деформирования горных пород в зоне опорного давления зависит не только от величины нагрузки, но и от времени её воздействия на рассматриваемую часть массива. Следовательно, оседания над разрезной печью и над линией очистного забоя должны иметь различные значения в силу разной степени развития реологических процессов. Рассмотрим значения оседаний η_z земной поверхности в двух обозначенных зонах для наблюдательных станций, заложенных над одиночными лавами в условиях Западного Донбасса (табл. 1). Представленные в табл. 1 результаты характеризуют условия полной подработки земной поверхности в главном сечении, параллельном направлению движения очистного забоя.

Таблица 1

Величины оседаний над границей выработанного пространства

Станция	Оседания η_z , мм			
	Над штреками	Над разрезной печью	Над очистным забоем	
			Диапазон	Среднее
5	195 (29%)			
7	166 (28%)			
8		282 (44%)		
9	196 (29%)	262 (40%)		
10		400 (44%)	90-143	120 (13%)
12		478 (55%)	75-201	133 (15%)
13		521 (58%)	44-80	59 (7%)
22	242 (28%)			
23		293 (33%)		
24	247 (28%)			
35		469 (39%)		

Примечание: в скобках показано соотношение оседания над границей очистной выработки η_z и максимального оседания земной поверхности по наблюдательной станции η_{max} .

Оседания над разрезной печью в среднем составляют 40-50% от величины максимального оседания земной поверхности. Над движущимся очистным забоем эти величины имеют значительный диапазон изменения от 6 до 30%. Над

подготовительными штреками наблюдается постоянство этого соотношения, характеризующееся значением 28%.

Можно предположить, что изменение отношения оседаний над разрезной печью к максимальным оседаниям является следствием выдавливания краевой части массива в выработанное пространство. Высота зоны полных сдвижений в массиве H_6 , в пределах которой возможно выдавливание пород, составляет 70 вынимаемых мощностей (рис. 4). Чем больший объем в массиве составляет зона 6, тем большие величины оседаний наблюдаются над границей выработанного пространства. Это иллюстрирует зависимость между η_c/η_{max} и соотношением высоты зоны H_6 к глубине разработки над границей очистной выработки H (рис. 5).

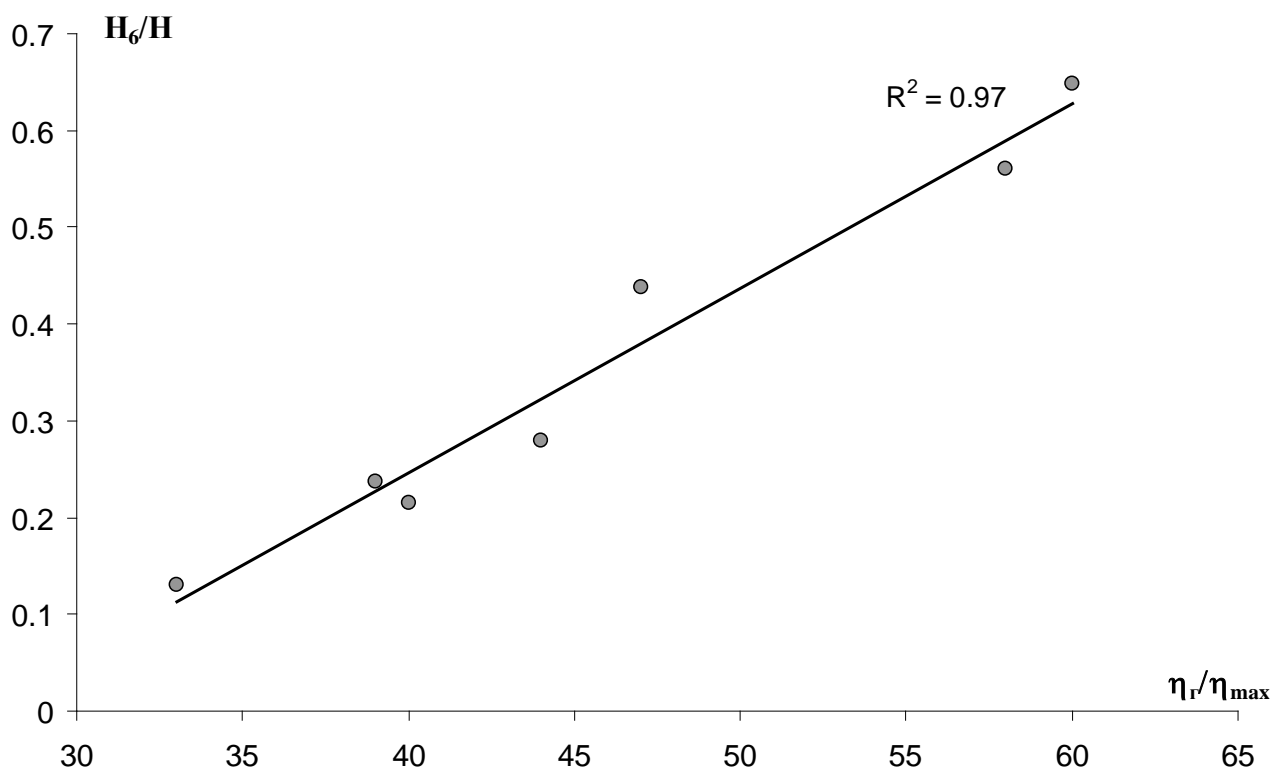


Рис. 5. Зависимость η_c/η_{max} от H_6/H

Наименьший разброс значений оседаний над движущимся очистным забоем получен по наблюдательной станции №13, где забой двигался равномерно со средней скоростью $v=65$ м/мес (разброс 50-75 м/мес). Для наблюдательной станции №10 диапазон изменения скоростей подвигания очистного забоя составил $v=17-80$ м/мес (среднее 25 м/мес), а для станции №12 – $v=15-60$ м/мес (среднее 20 м/мес). На основании этого можно предположить, что величина оседаний над движущимся очистным забоем зависит от скорости его подвигания. Увеличение оседаний при малых значениях v свидетельствует о значительном развитии реологических процессов над краевой частью разрабатываемого пласта. Незначительную дополнительную жесткость массиву над движущимся

щимся очистным забоем создает механизированная крепь. Нередки случаи, когда уменьшение скорости подвигания очистного забоя или его остановки приводили к посадке лавы на «жесткую». Это также свидетельствует о проявлении реологических свойств массива и накоплении дополнительных нагрузок по контуру очистной выработки.

На рис. 6 отображена зависимость между отношением оседания над движущимся очистным забоем к мощности пласта η_z/m и скоростью его подвигания v . В анализе использованы результаты инструментальных наблюдений (21 случай) в диапазоне изменения скоростей от 16 до 75 м/мес.

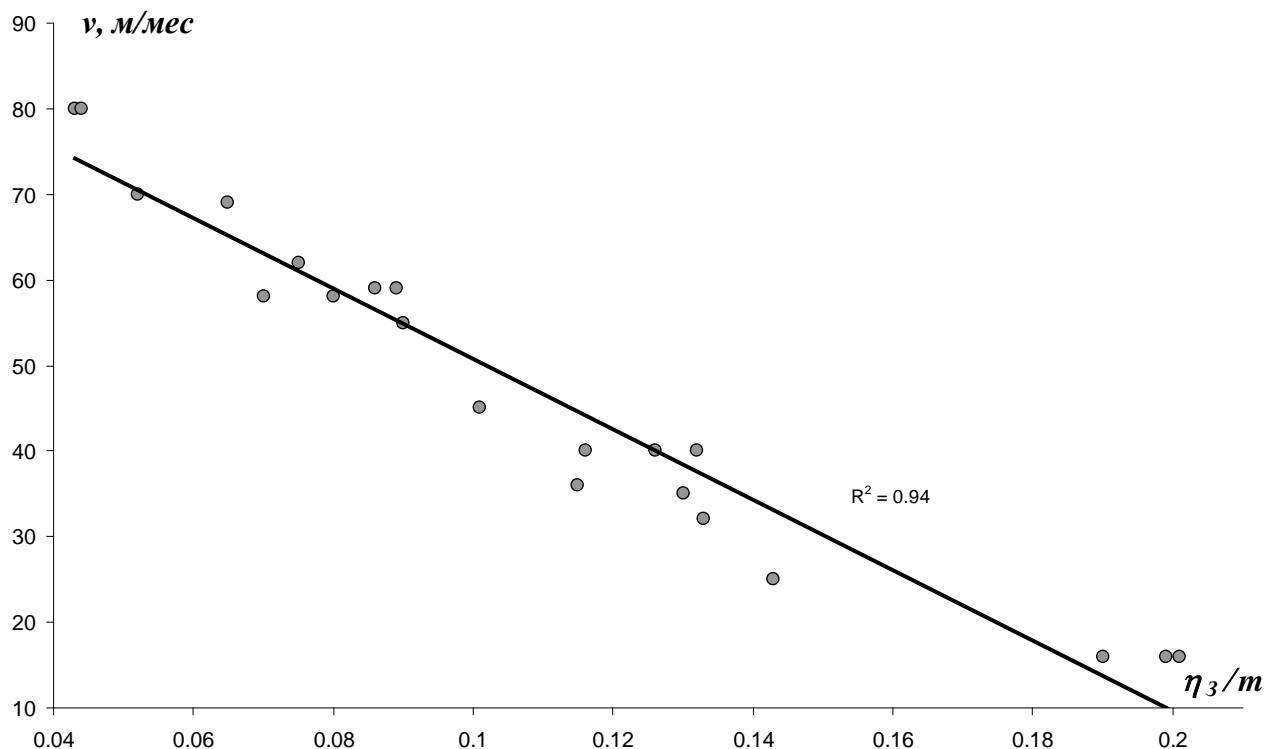


Рис. 6. Зависимость оседаний земной поверхности над движущимся очистным забоем от скорости его подвигания

С высокой степенью достоверности ($R^2=0.94$) можно утверждать, что зависимость (рис. 6) имеет линейный характер. Следует отметить, что изменение значений оседаний над линией забоя не приводит к изменению характера их распределения в полумульде над движущимся очистным забоем. При высоких скоростях отработки очистной выработки её влияние на земной поверхности «запаздывает», а границы полумульды смещаются в сторону выработанного пространства. Существует мнение, что такое явление является следствием несоответствия скорости подвигания очистного забоя и скорости передачи возмущения от кровли разрабатываемого пласта до земной поверхности. Исходя из этой точки зрения при одинаковой скорости подвигания очистного забоя и различных глубинах подработки степень запаздывания сдвижений и деформаций земной поверхности должна быть различна. Однако анализ результатов инст-

рументальных наблюдений не подтверждает этого. Следовательно, единственным объяснением является взаимосвязь между скоростью подвигания очистного забоя и скоростью протекания реологических процессов.

Перелік посилань

1. Кучин А.С. Сдвижение массива горных пород в Западном Донбассе / А.С. Кучин // Проблеми гірського тиску. Збірник наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – Вип.19 – С.38-61.
2. Кучин А.С. Формирование горизонтальных сдвижений при отходе лавы от разрезной печи / О.С. Кучин // Науковий вісник НГУ. – 2011. – № 5.– С.62-66.
3. Кучин А.С. Пространственное смещение точек при подработке / А.С. Кучин // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вып. 94. – С.128-134.
4. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок / Б.М. Усаченко. – Киев: Наук. думка. – 1979. – 136с.
5. Павлова Л.Д. Исследование влияния движущегося очистного забоя на характер зависания и циклического обрушения подработанных пород кровли угольных пластов // Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов // Известия Томского политехнического университета, 2005. –Т. 308. –№ 1. – С.39-44.
6. Амусин Б.З. Об использовании переменных модулей для решения одного класса задач линейной наследственной ползучести / Б.З. Амусин, А.М. Линьков // Известия АН СССР. Механика твердого тела. –1974. – № 6. –С. 162-166.

ABSTRACT

Purpose of this work is to establish the mechanism of soft rock mass deformation over longwall panels of Western Donbass.

The methods. The problem is solved by a simultaneous analysis of the results of surveying instrumental observations over the rock mass and the earth's surface displacement over the advancing longwall face. From the analysis the rock mass displacement zones over the advancing longwall face, that differ by manifestation of mining pressure and deformations in vertical and horizontal planes are suggested. The mechanism of rocks extrusion over the set-up entry, which explains the increase in horizontal displacement over that, is considered. The values of the Earth's surface subsidence over the set-up entry, the gateroads and the advancing longwall face are analyzed.

The originality. As a result, it is established that the values of the Earth's surface subsidence over the border of extracted panel – in particular over the set-up entry, the gateroads and the advancing longwall face are different. The dependence of the subsidence values on the ratio of the height of caving zone to a depth of development, as well as their dependence on the rate of longwall face advance is established.

Practical implications. The proposed mechanism of soft rock mass deformation over the set-up entry and the advancing longwall face allows for substantiating the difference in the values of horizontal displacements and deformations over them. The dependencies of Earth's surface subsidence over the border of extracted panel will improve the accuracy of subsidence values predictions.

Keywords: *subsidence, strain, rock, undermining, benchmark, borehole extensometer.*